

## $\alpha$ -cut Fuzzy TOPSIS 기법을 적용한 다기준 홍수취약성 평가 MCDM Approach for Flood Vulnerability Assessment using TOPSIS Method with $\alpha$ Cut Level Sets

이 규 민\* / 정 은 성\*\* / 전 경 수\*\*\*

Lee, Gyumin / Chung, Eun-Sung / Jun, Kyung Soo

### Abstract

This study aims to develop a multiple criteria decision making (MCDM) approach for flood vulnerability assessment which considers uncertainty. The flood vulnerability assessment procedure consists of three steps: (1) use the Delphi process to determine the criteria and their corresponding weights—the adopted criteria represent the social, economic, and environmental circumstances related to floods, (2) construct a fuzzy data matrix for the flood vulnerability criteria using fuzzification and standardization, and (3) set priorities based on the number of assessed vulnerabilities. This study uses a modified fuzzy TOPSIS method based on  $\alpha$ -level sets which considers various uncertainties related to weight derivation and crisp data aggregation. Further, Spearman's rank correlation analysis is used to compare the rankings obtained using the proposed method with those obtained using fuzzy TOPSIS with fuzzy data, TOPSIS, and WSM methods with crisp data. The fuzzy TOPSIS method based on  $\alpha$ -cut level sets is found to have a higher correlation rate than the other methods, and thus, it can reduce the difference of the rankings which uses crisp and fuzzy data. Thus, the proposed flood vulnerability assessment method can effectively support flood management policies.

**Keywords** : MCDM, fuzzy TOPSIS,  $\alpha$  cut level sets, uncertainty, flood vulnerability

### 요 지

본 연구에서는 다기준 의사결정기법을 적용한 홍수취약성 평가에 내재되는 불확실성을 고려한 평가기법을 제시하였다. 홍수취약성 평가과정은 3단계로 구성되며 1단계에서는 홍수와 연관되는 사회적, 경제적, 환경적 영향요인들 중에서 지역의 특성을 반영할 수 있는 평가인자를 선정하고 각 인자의 가중치를 책정한다. 이 때 델파이 설문조사기법을 적용하여 의사결정자들의 의견을 수렴한다. 2단계는 평가자료를 수집하고 평가에 사용할 수 있도록 가공하는 단계이며 불확실성 문제를 해소하기 위하여 퍼지수를 적용하였다. 마지막 단계에서 홍수취약성을 정량적으로 산정하여 취약지역의 우선순위를 도출한다. 본 연구에서는 퍼지수의 연산과정에서 발생하는 퍼지수의 과장 및 왜곡문제를 해소하기 위한  $\alpha$ -cut fuzzy TOPSIS 방법을 적용하였다. 또한 수립한 평가기법으로 산정한 결과에 대하여 퍼지자료(fuzzy data)를 적용한 fuzzy TOPSIS, 크리스프(crisp) 자료를 사용한 TOPSIS, WSM 등의 다양한 방법으로 평가한 결과들과의 상관관계 분석을 수행하였다. 분석결과,  $\alpha$ -cut fuzzy TOPSIS 방법은 대체로 모든 방법과 높은 상관성을 나타내었다. 즉, 크리스프 자료와 퍼지자료를 사용하는 평가방법 사이에서 발생하는 결과의 차이가  $\alpha$ -cut fuzzy TOPSIS를 이용하면 줄어드는 효과가 있다. 따라서 본 연구에서

\* 성균관대학교 공과대학 건설환경시스템공학과 박사후연구원 (e-mail: greenbeing@skku.edu)

Post Doctoral Fellow, Department of Civil and Environmental Engineering, Sungkyunkwan University

\*\* 교신저자, 서울과학기술대학교 건설시스템디자인공학과 조교수 (e-mail: eschung@seoultech.ac.kr)

Corresponding Author, Assistant Professor, School of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology

\*\*\* 성균관대학교 공과대학 수자원대학원 수자원학과 교수 (e-mail: ksjun@skku.edu)

Professor, Graduate School of Water Resources, Sungkyunkwan University

수립한 홍수취약성 평가방법은 불확실성 문제를 일정 부분 해소한 평가결과를 제시함으로써 치수정책 수립의 유용한 근거자료를 제공할 수 있다.

**핵심용어** : 다기준 의사결정 기법, fuzzy TOPSIS,  $\alpha$  cut level sets, 불확실성, 홍수취약성

## 1. 서 론

홍수는 자연재해로 인한 손실의 주요한 원인 중의 하나이며, 지진, 쓰나미와 같은 다른 유형의 재해들보다 더욱 빈번하게 피해를 일으킨다. 세계적 재보험 회사인 Munich Re (2012)는 자연재해로 인한 사상자 및 경제적 손실의 30%가 홍수에 기인하는 것으로 보고하였다. 또한 기후변화에 대한 많은 연구에서 아시아 지역의 홍수는 증가하는 추세로 예상되며, 미래에는 더욱 큰 재난의 원인이 될 가능성이 있다 (Lim and Lee, 2009). 이 같은 홍수는 재해 발생으로 인한 직접적인 인명피해와 재산피해 이외에도 지속적으로 사회를 유지하기 위한 다양한 기능들에 광범위하게 영향을 미친다. 따라서 최근에는 홍수와 복잡하게 연관되는 사회적, 경제적, 환경적인 요소들을 종합적으로 고려하는 홍수취약성 평가에 대한 관심이 증가되고 있다(Messner and Meyer, 2006; Merz et al., 2007; Adger, 2006; Green, 2004; Meyer et al., 2009; Kienberger et al., 2009; Scheuer et al., 2011; Jun et al., 2011; Son et al., 2011; Kim et al., 2012).

다기준 의사결정 기법(Multi-Criteria Decision Making, MCDM)은 홍수재해가 야기하는 다양한 피해에 대한 취약의 정도를 관점에 따라 평가할 수 있는 적절한 도구이다(Meyer et al., 2009; Kienberger et al., 2009; Scheuer et al., 2011). 그러나 다기준 접근법을 적용한 평가에는 적절한 평가인자를 결정하고 각 인자의 중요도를 판단하는 과정에서 결정에 임하는 당사자의 전문성, 객관성과 가중치의 수집방법 등에서 불확실성이 발생한다(Feng and Wang, 2000; Hwang and Yoon, 1981; Kaufmann and Gupta, 1991; Son et al., 2011). 따라서 객관적이고 합리적인 평가인자와 가중치를 확보하는 것은 매우 중요하다. Yoo and Kim (2008)은 델파이 조사기법이 전문가 의견을 수렴하여 적합한 취약성 지표를 추출하는데 유용한 방법임을 밝힌 바 있으며, Kim et al. (2011)은 수자원 분야의 전문가들을 대상으로 우리나라 중소하천의 기후변화 취약성 분석을 위해 델파이 기법을 사용하여 지표를 선정하는 바 있다. 이러한 다기준 기법의 평가에서는 수집된 평가인자의 자료와 가중치로부터 평가 값을 산정하여 순위를

결정한다. 따라서 평가 값을 산정하는 기법에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 특히, Hwang and Yoon (1981)에 의해 제안된 TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution) 방법은 대안과 이상해, 부이상해간의 거리를 계산하여 순위를 도출하는 합리적이고 적절한 접근법으로 최근 다양한 다기준 의사결정 문제에 적용되고 있다(Shih et al., 2007). 또한 다기준 의사결정기법의 적용에 있어서 평가인자의 측정값과 가중치에 내재되는 불확실성 문제를 고려하여 퍼지구간 값을 사용하는 fuzzy TOPSIS 모형이 Ashtiani et al. (2009)에 의해 제안되었다. Jun et al. (2011)과 Kim et al. (2012)은 델파이 기법을 이용하여 평가인자와 가중치를 도출하고 fuzzy TOPSIS기법을 사용하는 평가기법으로 우리나라 16개 광역시도를 대상으로 기후변화에 따른 홍수취약성을 평가하였다.

그러나 fuzzy TOPSIS가 각 대안간의 상대적인 근접도를 제시하는 합리적 기법(Triantaphyllou and Lin; 1996)으로 알려져 있음에도 불구하고 이 기법의 사용에 있어서는 퍼지수의 산술적 연산과정에서 심한 왜곡과 과장이 발생할 수 있다. 즉, 수집된 퍼지수를 더하고 곱하는 연산 과정에서 퍼지수가 지나치게 확장되어 최종적으로 우선순위를 결정하기 위한 비퍼지화(defuzzification) 과정에서 평가결과를 왜곡시킬 수 있다. Wang and Elhag (2006)은  $\alpha$ -level set과 퍼지 확장 이론(fuzzy extension principle)을 결합하여 수정한 fuzzy TOPSIS 방법을 개발하였다. 이 때 최적화된 해는 비선형계획법(NonLinear Programming problem, NLP)으로 Microsoft Excel Solver에 내장된 비선형 최적화 방법인 Generalized Reduced Gradient를 이용하여 찾았다.

본 연구에서는 홍수취약성에 대한 평가인자의 결정과 가중치를 산정하는 과정에 델파이 기법을 이용하고  $\alpha$ -cut fuzzy TOPSIS 평가기법으로 한강의 하류지역에 대한 평가를 수행하였다. 또한 현재 의사결정방법에서 가장 일반적으로 적용하고 있는 가중합계법(Weighted Sum Method, WSM)과 TOPSIS, fuzzy TOPSIS 방법으로 평가한 결과를  $\alpha$ -cut fuzzy TOPSIS와 비교 검토하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 홍수취약성 평가과정

본 연구에서의 홍수취약성 평가과정은 Fig. 1과 같이 3 단계로 구성된다. Step 1은 홍수취약성을 평가하기 위한 인자를 선정하고 인자에 대한 가중치를 산정하는 단계이다. 이 때 델파이 설문조사 기법을 적용하여 전문가를 대상으로 반복적인 설문조사를 통하여 의견을 수렴한다. Step 2에서는 선정된 평가인자에 대한 입력자료를 수집하고 퍼지수로 가공한다. 평가에 사용하기 위한 공간정보는 GIS 소프트웨어인 ArcGIS를 이용하여 평가대상 지역별로 평가자료를 구축한다. 이 때 수집한 자료들의 측정 단위 및 범주를 고려하여 표준화기법을 적용한다. 마지막 단계인 Step 3에서  $\alpha$ -cut fuzzy TOPSIS 기법을 이용하여 취약성을 평가하고 취약지역의 우선순위를 도출한다.

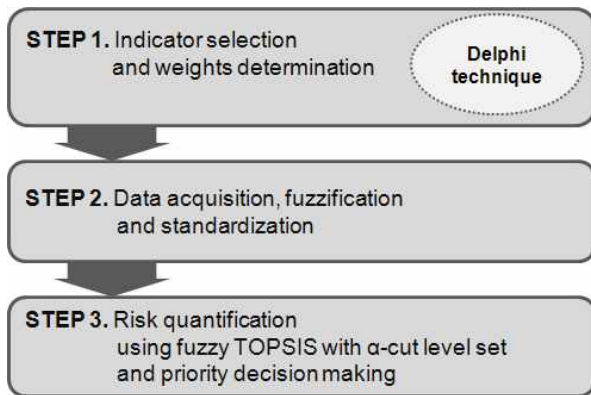


Fig. 1. Flood Vulnerability Assessment Procedure Using  $\alpha$ -cut Fuzzy TOPSIS with Delphi Technique

### 2.2 델파이 조사기법

델파이 기법은 사회학 분야에서 널리 쓰이는 패널식 조사연구기법이다(Linstone and Turoff, 1975). 델파이 절차는 일반적인 설문조사 방법과 협의회 방법의 장점을 결합시킨 방법이다. 설문참여자는 델파이 패널(Delphi panel) 즉, 델파이 토론의 참여자가 된다(Lee, 2006). 델파이 패널은 델파이 절차가 반복되는 동안 피드백된 이전 회의의 조사결과, 즉 통계적 집단 반응과 소수의견에 대한 보고서를 참고하여 자신의 판단을 수정 보완할 수 있다(Richey et al., 1985; Adler and Ziglio, 1996; Angus et al., 2003; Jun et al., 2011; Son et al., 2011; Kim et al., 2012). 따라서 복잡한 문제를 처리하는데 있어 의사결정그룹의 커뮤니케이션 과정을 구조화하여 합의를 도출할 수 있다. 본 연구에서는 홍수취약성 평가인자를 선정하고 각 인자의

가중치를 산정하기 위한 델파이 조사기법을 수립하고 조사에 참여할 전문가 그룹을 선정하였다. 델파이 패널은 수자원분야의 전문가를 대상으로 선정하였으며 학계, 산업계와 정부기관의 의견을 고루 반영할 수 있도록 구성하였다. 최종적으로 설문에 응한 델파이 패널은 총 44인으로 70%이상이 관련분야에 10년 이상의 경력을 가진 전문가이다. 패널들은 58%가 박사학위, 32%가 석사학위 소지자로서 종사분야는 정부출연 연구소의 연구원이 34%, 대학이 27%, 국가기관과 산업체가 14%와 23%이다. 연령층은 30대가 43%, 40대가 41%, 50~60대가 12%로서 방재 관련 연구에 참여한 경험이 있는 전문가는 71%였다.

설문조사는 홍수취약성 평가인자를 선정하는 첫 번째 과정과 가중치를 선정하는 두 번째 과정으로 시행하였다. 먼저 연구진이 홍수취약성 평가인자의 초안을 작성하고 이를 설문 참여자에게 배포하여 각 인자의 중요성을 판단하도록 하였다. 이 과정에서 설문조사 참가자는 인자의 적절성, 즉 홍수취약성 평가에 있어 해당인자의 필요성에 대하여 자신의 의견을 “필요하지 않음, 필요함, 중요함”의 세 가지 선택사항 중 한 가지에 응답해야 하며 연구자는 이를 수집, 분석하여 평가 인자를 채택하였다. 다음 과정에서는 확정된 평가인자를 설문 응답자들에게 제시하여 각 평가 인자에 대한 가중치를 측정하도록 하였다. 각 설문 응답자들에 의해서 작성된 가중치들은 수집, 분석되어 각 인자별로 하나의 값으로 측정된다. 마지막 단계에서 참여한 설문 응답자들은 이 분석결과를 참조하고 가중치를 다시 채택하여 자신의 의견을 개정할 수 있다. 즉, 설문에 참여한 각 패널은 1차 가중치 설문조사를 통하여 홍수취약성 평가인자에 대한 주관적인 가중치를 선정하고 이를 분석한 결과를 연구진으로부터 피드백 받아 참고한 후 2차 설문조사에 응하여 가중치를 재선정하게 된다. 이와 같은 델파이 조사과정은 Fig. 2에 제시된 바와 같다.

### 2.3 fuzzy 가중치

다기준 의사결정 기법의 주요한 관심사 중의 하나는 평가에 사용하는 인자에 대하여 평가목적에 따라 해당 인자가 내포하는 중요성의 정도를 알아내는 것이다. 즉, 인자에 대한 가중치를 결정하고 이를 적용함으로써 인자의 중요성을 정량적으로 제시하는 것이다. 이 같은 가중치는 평가기법의 적용에 있어서 수집된 인자의 자료와 함께 반영되어 평가결과에 큰 영향을 미친다(Hyde et al., 2005). 가중치에 대한 많은 연구에서, 가중치의 측정 방법에 따라 결과의 차이가 크게 나타날 수 있는 것으로 제시하고 있다(Schoemaker and Waid, 1982; Moshkovich et al.,

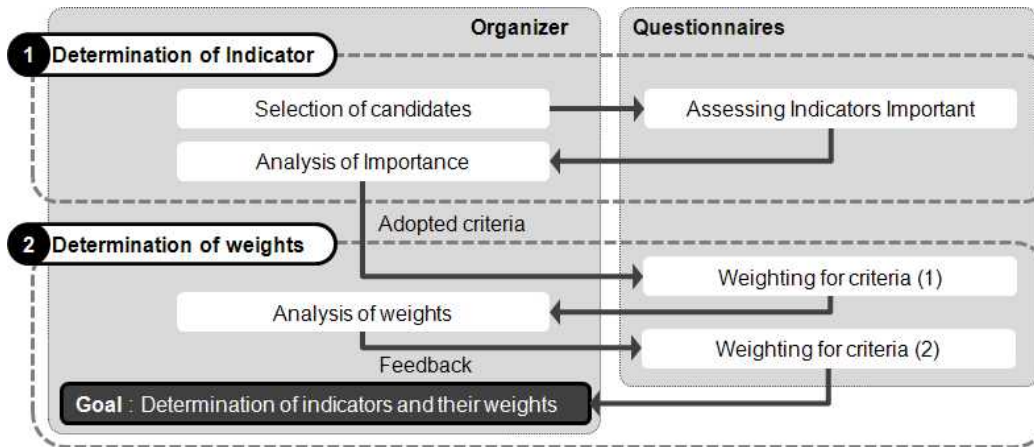


Fig. 2. Delphi Procedure to Determine Flood Vulnerability Criteria and Their Weights

1998; Kheireldin and Fahmy, 2001). 특히 설문조사를 통한 가중치의 책정과 같이 인간의 판단을 근거로 하는 경우, 제한된 시간 및 비용 등의 제약 요인에 의하여 참여자가 정보를 확보할 수 없거나 정보를 처리하는데 있어 한계를 가질 수 있다. 하지만 애매모호성(fuzzyness)을 인정하는 퍼지 논리를 적용하면 이와 같은 문제점을 일부 해소할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 비교적 계산이 간단하고 정보를 표현하여 처리하는데 유용한 삼각퍼지수를 적용하였다. 가중치 설문조사에 참여한 전문가들은 Fig. 3 과 Table 1에 나타난 바와 같이 7단계로 제공된 퍼지 가중치에 대하여 각 인자의 중요도를 설정하였다.

#### 2.4 $\alpha$ -cut fuzzy TOPSIS

각 인자의 평가지수는 자료를 수집하여 표준화한 인자의 값에 설문조사를 통하여 선정한 가중치를 이용하여 결정한다. 일반적으로 사용되는 MCDM 기법은 가중합계법으로 인자별로 표준화한 자료에 가중치를 곱하여 합산하는 방법이다. 그러나 가중합계법은 산술적인 수치의 합계만을 이용하여 평가결과를 제시하므로 최적의 합의를 결정하는 데 있어서 합리적이지 않다는 관점이 있다. 따라서 본 연구에서는 Hwang and Yoon (1981)에 의해 제안된 TOPSIS 방법을 적용하였다. TOPSIS는 양의 이상적인 해(PIS: Positive Ideal Solution)로부터 가장 가까운 거리에 있고 부의 이상적인 해(NIS: Negative Ideal Solution)로부터는 가장 먼 거리에 있는 대안을 우선적으로 선정하게 하는 개념으로 최선의 대안과 최악의 대안을 동시에 고려하여 인간의 합리적 선택이 가능하도록 유도하는 기법이다(Lai et al., 1994; Chu, 2002; Jun et al., 2011). 또한 다속성 관점에서 모든 대안들에 대한 평가결과를 쉽게 계산해서 나타낼 수 있다(Kim et al., 1997; Shih et al., 2007;

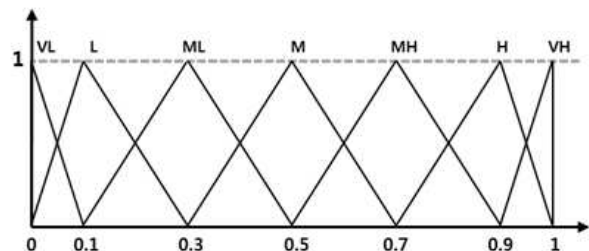


Fig. 3. Fuzzy Linguistic Terms for the Weight

Table 1. Linguistic Variables for the Importance Weight

Importance	Abbreviation	Membership function
Very low	VL	(0.0, 0.0, 0.1)
Low	L	(0.0, 0.1, 0.3)
Medium low	ML	(0.1, 0.3, 0.5)
Medium	M	(0.3, 0.5, 0.7)
Medium high	MH	(0.5, 0.7, 0.9)
High	H	(0.7, 0.9, 1.0)
Very high	VH	(0.9, 1.0, 1.0)

Lee and Chung, 2007; Chung and Lee, 2009). TOPSIS 방법을 적용한 본 연구에서 양의 이상적인 해는 가장 취약한 지역이며 부의 이상적인 해는 그 취약의 정도가 가장 낮은 지역이다.

또한 최근에는 홍수취약성과 같이 자연계로부터 수집되는 무작위하고 애매모호한 자료와 정량화하기 어려운 사회·경제적 상황을 포함하는 다양한 자료를 필요로 하는 작업에 있어서 내재되는 불확실성문제를 해소하기 위해서 퍼지수를 적용하는 방법을 고려할 수 있다. Ashtiani et al. (2009)은 크리스프 자료대신 퍼지화한 자료와 가중치

를 이용하는 fuzzy TOPSIS 방법을 제안하였다. 그러나 fuzzy TOPSIS가 각 대안간의 상대적인 근접도를 제시하는 합리적 기법(Triantaphyllou and Lin; 1996)으로 알려져 있음에도 불구하고 이 기법의 사용에 있어서는 퍼지수의 산술적 연산과정에서 심한 왜곡과 과장이 발생할 수 있다. 이 같은 문제점을 해소하기 위하여 Wang and Elhag (2006)은  $\alpha$ -level set 집합과 퍼지 확장 이론을 기반으로 fuzzy TOPSIS 방법을 제시하였다.  $\alpha$ -cut fuzzy TOPSIS 기법의 평가절차는 다음과 같다.

퍼지수  $A$ 의  $\alpha$ -cut은 다음 Eq. (1)과 같이 정의할 수 있다(Kaufmann and Gupta, 1991).

$$(\tilde{A})_\alpha = \{x | f_\alpha(x) \geq \alpha\} \quad (1)$$

이 때,  $x \in R, \alpha \in [0, 1]$  이다.

$(\tilde{A})_\alpha$ 는 비공(non-empty)의 하한과 상한이 각각  $(a)_\alpha^L$ 과  $(a)_\alpha^U$ 인 연속적인 폐쇄구간  $R$ 에 포함되고  $(\tilde{A})_\alpha = [(a)_\alpha^L, (a)_\alpha^U]$ 로 나타낼 수 있다. 예를 들어, 삼각퍼지수가  $\tilde{A} = (l, m, n)$  라면  $A$ 의  $\alpha$ -cut은 다음의 Eq. (2)과 같이 표현할 수 있다.

$$(\tilde{A})_\alpha = [(a)_\alpha^L, (a)_\alpha^U] = [(m-1)\alpha + l, -(n-m)\alpha + n] \quad (2)$$

퍼지수  $A$ 와  $B$ 가  $A, B \in R^+$  라면  $A$ 와  $B$ 의  $\alpha$ -cut은  $(\tilde{A})_\alpha = [(a)_\alpha^L, (a)_\alpha^U]$ 와  $(\tilde{B})_\alpha = [(b)_\alpha^L, (b)_\alpha^U]$ 로 나타낼 수 있다.  $A$ 와  $B$  두 퍼지수의 구간 연산(interval arithmetic) 방법은 다음의 Eqs. (3)~(5)에 나타내었다.

$$(A \oplus B)_\alpha = [(a)_\alpha^L + (b)_\alpha^L, (a)_\alpha^U + (b)_\alpha^U] \quad (3)$$

$$(A \ominus B)_\alpha = [(a)_\alpha^L - (b)_\alpha^L, (a)_\alpha^U - (b)_\alpha^U] \quad (4)$$

$$(A \otimes B)_\alpha = [(a)_\alpha^L (b)_\alpha^L, (a)_\alpha^U (b)_\alpha^U] \quad (5)$$

$\alpha$ -cut TOPSIS 기법을 적용하는 방법은 다음과 같다. 먼저 다음의 Eqs. (6) and (7)을 통하여 표준화된 삼각퍼지 자료 행렬과 가중치에 대한  $\alpha$ -level cut 자료군을 생성한다.

$$(r_{ij})_\alpha = [(r_{ij})_\alpha^L, (r_{ij})_\alpha^U] \quad (6)$$

$$(w_{ij})_\alpha = [(w_{ij})_\alpha^L, (w_{ij})_\alpha^U] \quad (7)$$

여기서  $(x_{ij})_\alpha = [(x_{ij})_\alpha^L, (x_{ij})_\alpha^U]$  은  $\tilde{x}_{ij} (i=1, \dots, n; j=1, \dots, m)$ 의  $\alpha$ -level set이고 양의 이상해는  $x_j^*$ , 부의 이상해는  $x_j^-$ 이다. 여러  $\alpha$ -level에 대하여 다양한  $\alpha$ -level set이 생성되며  $(RC_i)_\alpha = [(RC_i)_\alpha^L, (RC_i)_\alpha^U]$ 는 NLP models을 이용하여 산정할 수 있다(Zimmermann, 1991).

$$(RC_i)_\alpha^L = \min \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^m (w_j (r_{ij})_\alpha^L)^2}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m (w_j (r_{ij})_\alpha^L)^2 + \sum_{j=1}^m (w_j (r_{ij})_\alpha^L - 1)^2}} \quad (8)$$

$$(RC_i)_\alpha^U = \max \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^m (w_j (r_{ij})_\alpha^U)^2}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m (w_j (r_{ij})_\alpha^U)^2 + \sum_{j=1}^m (w_j (r_{ij})_\alpha^U - 1)^2}} \quad (9)$$

이 때  $(w_j)_\alpha^L \leq w_j \leq (w_j)_\alpha^U, j=1, \dots, m$  이다.

$\tilde{RC}_i$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\tilde{RC}_i = \bigcup_{\alpha} \alpha (RC_i)_\alpha = \bigcup_{\alpha} \alpha [(RC_i)_\alpha^L, (RC_i)_\alpha^U], 0 < \alpha < 1 \quad (10)$$

Dubios and Prade (1978)에 의해 제시된 Averaging Level Cuts (ALC) 기법인 다음의 Eq. (11)을 사용하여 비퍼지화(defuzzification)한 후 이로부터 우선순위를 책정한다(Oussalah, 2002).

$$(RC_i)_{ALC}^* = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left( \frac{(RC_i)_{a_j}^L + (RC_i)_{a_j}^U}{2} \right), i=1, \dots, n \quad (11)$$

### 3. 평가 대상유역

수립한 홍수취약성 평가기법을 한강을 대상유역으로 하여 적용하였다. 한강유역은 한반도의 중앙에 위치하고 있으며 수도인 서울을 포함한 우리나라의 경제 및 사회 문화 전반에 있어서 가장 중요한 지역이다. 한강유역은 북한강과 남한강 두 중요 지류와 많고 작은 지류들로 구성되어있다. 총 연장은 5,417 km이며, 총 유역면적은 우리나라 전체 면적의 27%를 차지하는 26,018 km<sup>2</sup>에 이른다. 본 연구에서는 북한강과 남한강이 합류하는 팔당댐을 시작으로 하여 한강과 서해가 만나는 지점까지를 평가대상 지역으로 선정하였다. 한강 하류지역은 잦은 수해로 인하여 홍수 피해저감 및 복구에 많은 예산이 투입되어 왔다. 특히, 지난 2011년에는 7월 26일부터 7월 28일까지 4일간 동두천 675.0 mm, 서울 587.5 mm, 인제 361.0 mm, 문산 494.0 mm의 강도 높은 집중 호우가 발생하여 도로, 하천, 소하천에서 발생하는 산사태 등 공공시설의 피해와 주택 파손, 침수 등의 사유재산의 피해가 발생하였다. 이로 인해 서울에서만 61명의 사상자가 발생하였고 14,836세대 34,152명의 이재민과 30,769백만 원의 재산피해가 기록되었다. 또한 재해로 인한 전력망의 피해는 경제적, 사회적인 손실로 이어졌다. 2013년 7월에도 강남구 강남역과 서초구

사당역 부근이 일부 침수되어 피해가 발생하였다. 이와 같이 한강하류 지역은 매년 홍수로 인한 피해가 발생하여 사회·경제적 손실을 일으키고 있다. 따라서 본 연구에서는 한강에 인접하여 홍수피해의 가능성이 높은 17개의 지자체를 Fig. 4와 같이 평가대상 지역으로 선정하였다.

#### 4. 다기준 홍수취약성 평가기법의 적용

##### 4.1 다기준 홍수취약성 평가인자의 선정 및 가중치 산정(Step 1)

홍수는 인명피해와 경제적 손실 이외에도 인간사회의 지속성과 관련된 다양한 부분에 심각한 타격을 남기는 재해이다. 따라서 홍수취약성을 평가하기 위해서는 이와 관련된 인간사회 전반의 다양한 요인을 반영해야 한다. 특히 홍수의 피해로 지속성에 영향을 받을 수 있는 사회, 경제적인 요소들은 매우 중요한 평가인자이다(Sebald, 2010). 본 연구에서는 인자의 선정 범위를 사회적, 경제적, 환경적 분야로 구분하고 각 분야별로 지속가능성을 고려한 인자를 선정하였다. 평가인자는 델파이 기법에 의하여 Table 2와 같이 선정되었다. 사회적 인자로는 인구와 같이 해당 지역의 잠재적 피해가능요소와 연평균 홍수피해 사상자 수 등 실제로 발생한 피해기록, 해당지역에서 홍수에 대응하기 위한 사회적 노력(예를 들어 지역정부의 방재전담 공무원수 등)들을 포함하여 홍수에 대한 사회적인 잠재적 취약정도를 산정할 수 있도록 하였다. 또한 사업체수, 고

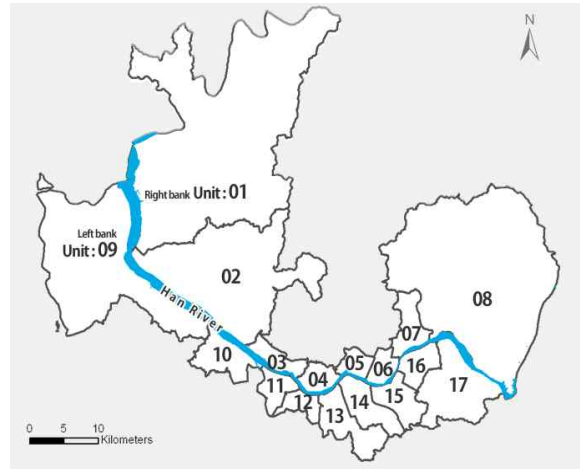


Fig. 4. Study Area and Sub-region Map: the Downstream Region of the Han River

용률 등의 경제적 생산능력과 공시지가와 같이 자료수집이 용이하면서 해당지역의 경제적인 잠재력을 나타내는 인자와 연평균 피해액, 연최대 피해액 등 실제로 발생한 경제적 홍수피해 인자를 경제적 요소로 분류하였다. 자연재해인 홍수는 확률론적 접근을 통하여 홍수의 발생 가능성과 발생 규모 등을 산정할 수 있으며 이를 환경적 요소로 선정하였다. 따라서 가중치는 1단계로 각 인자가 소속되는 분야, 즉 사회적, 경제적, 환경적 그룹에 대해서 수집하고, 2단계로 각 인자 자체의 가중치를 수집한 뒤 이를 조합하여 최종적인 인자의 가중치를 결정하였다.

Table 2. A Decision Group of Criteria and Their Weights

Character	Criteria	Weight
Social factors (0.16, 0.36, 0.55)	Population growth	(0.10, 0.25, 0.46)
	Population	(0.14, 0.30, 0.49)
	Urban area	(0.09, 0.21, 0.41)
	Annual average flood victims	(0.14, 0.32, 0.55)
	Annual average flood casualties	(0.23, 0.44, 0.68)
	Number of local government employment	(0.04, 0.13, 0.30)
Economic factors (0.30, 0.54, 0.69)	Number of establishments	(0.06, 0.18, 0.22)
	The labor force participation rate	(0.15, 0.31, 0.39)
	Average cost of land	(0.13, 0.29, 0.48)
	Annual average flood damage	(0.30, 0.52, 0.71)
	Annual maximum flood damage	(0.30, 0.55, 0.73)
Environmental factors (0.74, 0.93, 0.95)	Maximum inundation area	(0.21, 0.45, 0.64)
	200-year frequency flood	(0.14, 0.29, 0.50)
	Maximum flood	(0.19, 0.39, 0.63)
	200-year flood inundation area	(0.22, 0.42, 0.65)
	Flood defense facilities	(0.07, 0.19, 0.38)

#### 4.2 홍수취약성 평가자료 수집 및 표준화(Step 2)

평가인자의 자료는 국가수자원관리 종합정보시스템(WAMIS), 통계청, 소방방재청 등 신뢰도 높은 기관에서 제공하는 자료를 대상으로 평가 단위 지역별로 수집하였다. 수집된 자료는 서로 다른 단위를 가지고 있기 때문에 통합 지수를 만들기 위해서는 다양한 값들을 표준화할 방법이 필요하다. 본 연구에서는 서로 다른 축척을 가진 각 자료의 삼각퍼지수를 고유의 성질을 유지하면서 비교 가능한 축척으로 표준화하기 위하여 cost-benefit 기법을 사용하였다.

이와 같이 선정된 평가인자의 자료를 수집하고 표준화하여 사회적, 경제적, 환경적 취약요소별로 그룹화하여 Fig. 5에 나타내었다. 환경적 요소는 대체적으로 평가구역의 하류지역에서 더욱 큰 값을 나타내는 경향이 있으나, 사회적 요소와 경제적 요소는 위치에 따른 경향성이 나타나지 않았다. 사회적 요소가 가장 크게 나타난 곳은 우안의 3번 지역인 마포구와 좌안의 13번 지역인 서초구이다. 경제적 요소는 우안의 7번 지역인 구리시와 좌안의 11번 지역인 서초구가 가장 높게 나타났다. 구리시의 경우 면적당 연평균 홍수피해액과 연최대 홍수피해액이 가장 높은 지역이고 11번 지역인 영등포구는 경제활동 참가율, 사업체수, 면적당 연평균 홍수피해액, 면적당 연최대 홍수피해액 등에서 높은 수치를 나타내었다. 환경적 취약요소에서는 우안의 3, 4, 5번 지역인 마포구, 용산구, 성동구가 유사한 수치로 높은 값을

나타냈고 좌안에서는 9번 지역이 가장 높게 나타났다. 우안의 마포구, 용산구, 성동구의 경우 200년 빈도 홍수량, 발생 최대 홍수량에서 높은 수치를 나타내었고, 좌안의 김포시는 전 지역을 통틀어 가장 높은 환경적 취약성이 나타났는데, 200년 빈도 홍수량, 발생 최대 홍수량뿐만 아니라 최대 침수 면적과 홍수범람지역 비율에서도 높은 수치를 나타내었다.

#### 4.3 홍수취약성에 대한 $\alpha$ -cut fuzzy TOPSIS 평가 (Step 3)

$\alpha$ -cut fuzzy TOPSIS 기법으로 평가한 결과로부터 서초구와 강남구가 가장 취약한 지역으로 분석되었으며 남양주시와 하남시가 상대적으로 덜 취약한 것으로 나타났다. 평가결과는 Table 3에 나타내었다. 또한  $\alpha$ -cut fuzzy

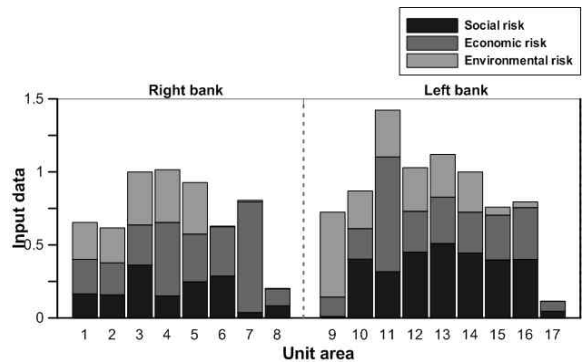


Fig. 5. Distributions of Each Sub-section

Table 3. Evaluating Results of  $\alpha$ -cut Fuzzy TOPSIS Method

	Name of District		Defuzzified Value	Rank
Right bank	1	Paju	0.6316	10
	2	Goyang	0.5712	11
	3	Mapho	0.7030	4
	4	Youngsan	0.7134	3
	5	Sungdong	0.6747	7
	6	Kwangjin	0.4208	14
	7	Guri	0.4196	15
	8	Namyangju	0.2431	17
Left bank	9	Gimpo	0.5546	12
	10	Kangseo	0.6500	8
	11	Youngdungpo	0.6894	5
	12	Dongjak	0.6893	6
	13	Seocho	0.7416	1
	14	Kangnam	0.7142	2
	15	Sungpa	0.4735	13
	16	Kangdong	0.6385	9
	17	Hanam	0.2505	16

TOPSIS 방법을 적용한 평가결과를 다른 평가기법들과 비교해 보기 위하여  $\alpha$ -level cut set을 적용하지 않은 fuzzy TOPSIS 방법의 평가결과와 퍼지수를 사용하지 않은 일반적인 가중치 산정법인 순위법, 비율법으로 산정한 가중치를 적용한 TOPSIS 방법과 널리 사용되는 평가방법인 가중합계법(Weighted Sum Method, WSM)으로 산정한 취약성 평가결과를 Fig. 6에 나타내었다. 이때 순위법, 비율법 가중치는 퍼지가중치를 수집한 전문가들을 대상으로 동일한 방법으로 산정하였다.

각 방법들에 의하여 가장 취약한 곳으로 평가된 지역은 분석해 보면  $\alpha$ -cut fuzzy TOPSIS 방법에서 가장 취약한 지역이었던 서초구는 fuzzy TOPSIS에서는 3순위로 나머지 방법에서는 5~8순위로 나타나 차이를 보였다. 그러나  $\alpha$ -cut fuzzy TOPSIS에서 3순위와 4순위로 평가되었던 마포구와 영등포구는 나머지 방법들에서도 비슷한 순위로 평가되었다. 가장 덜 취약한 지역인 남양주시와 하남

시는 모든 방법에서 동일한 결과가 나타났다.

#### 4.4 홍수취약성 평가결과와 분석

평가기법 및 가중치 산정방법에 따른 순위 사이의 상관성을 정량적으로 확인하기 위해서 스피어만 상관계수(Spearman rank coefficients)를 산정하여 Table 4에 제시하였다. 가중합계법을 사용한 경우에는 순위법과 비율법 가중치를 적용한 결과간의 상관성이 90%로 매우 높게 나타났다. 그러나 TOPSIS 평가방법을 사용한 결과에서는 두 가지 가중치법의 상관성이 36%로 매우 낮게 나타났다. 이로부터 같은 평가방법을 적용하는 경우에도 가중치 책정방법에 따라 결과가 크게 변동될 수 있음을 알 수 있다. 퍼지수를 적용한 fuzzy TOPSIS,  $\alpha$ -cut fuzzy TOPSIS 방법은 각 평가방법들에 대하여 대체로 높은 상관성을 나타내었다. fuzzy TOPSIS 방법은 TOPSIS 방법의 평가결과들과 각각 82%, 86%의 높은 상관성을 보였으나 순위법

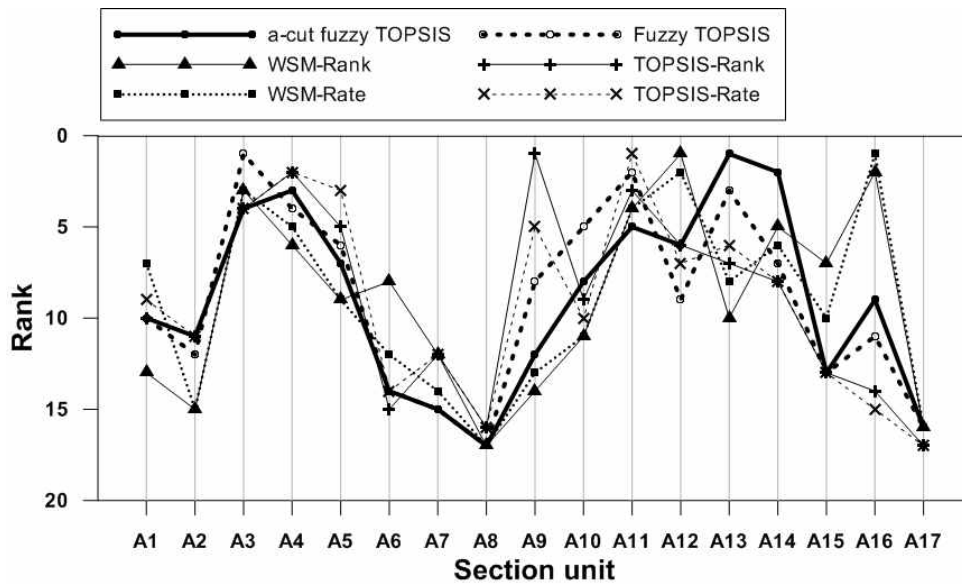


Fig. 6. Ranking Comparisons

Table 4. Spearman's Rank Correlation Coefficients

MCDM technique	$\alpha$ -cut fuzzy TOPSIS	fuzzy TOPSIS	TOPSIS-Rank	TOPSIS-Rate	WSM-Rank	WSM-Rate
$\alpha$ -cut fuzzy TOPSIS	-	88%	67%	73%	59%	72%
fuzzy TOPSIS	-	-	82%	86%	46%	60%
TOPSIS-Rank	-	-	-	36%	46%	43%
TOPSIS-Rate	-	-	-	-	34%	46%
WSM-Rank	-	-	-	-	-	90%
WSM-Rate	-	-	-	-	-	-



가중치를 적용한 가중합계법과는 46%로서 상관성이 낮았다. 그러나  $\alpha$ -cut fuzzy TOPSIS 방법은 순위법 가중치를 적용한 가중합계법과의 상관성이 59%로 상대적으로 다른 방법들에 비하여 높게 나타났으며 이는 다른 방법들과의 상관성 산정결과에서도 확인할 수 있다. 이와 같은 결과로부터  $\alpha$ -cut fuzzy TOPSIS 방법이 가중치의 불확실성에 대하여 해소효과를 가진 것으로 판단할 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구의 목표는 홍수에 의한 피해와 지속적으로 연 관되는 사회적, 문화적, 경제적, 환경적인 다양한 요소를 반영할 수 있는 다기준 의사결정기법의 홍수취약성 평가에 있어서의 불확실성을 감소시키는 것이다. 이를 위하여 평가과정에 있어 인자의 선정 및 가중치 책정과정에서의 불확실성 문제를 고려한 델파이 설문조사기법을 적용하여 인자를 선정하고 가중치를 산정하였다. 또한 평가결과의 불확실성을 감소시키는 효과가 있는 것으로 검증된 바 있는 fuzzy TOPSIS 방법을 개선한  $\alpha$ -cut fuzzy TOPSIS 방법의 새로운 홍수취약성 평가기법을 적용하였다. 이 방법은 다기준 의사결정기법을 이용한 평가에 내재되는 불확실성 문제를 고려한 퍼지수의 적용에 있어서 연산과정에서 발생하는 퍼지수의 왜곡 및 과장을 해소할 수 있다.

본 연구에서 수립한 평가과정은 델파이 기법을 통하여 인자와 가중치를 선정하는 1단계와 선정된 인자의 자료를 수집하여 퍼지화하고 표준화하는 2단계,  $\alpha$ -cut fuzzy TOPSIS 기법을 사용하여 우선순위를 도출하는 마지막 단계까지 총 3단계로 구성하였다. 수립한 평가절차를 한 강 하류지역의 강에 인접한 17개 지자체를 대상으로 적용한 결과, 대상지역 가운데 서초구와 강남구가 가장 취약한 지역으로 평가되었다.

또한  $\alpha$ -cut fuzzy TOPSIS 방법으로 평가한 결과와 fuzzy TOPSIS 방법으로 평가한 결과 및 퍼지수를 사용하지 않는 평가방법인 TOPSIS, WSM 기법에 순위법과 비율법으로 수집한 가중치를 적용하여 평가한 결과들과의 상관관계를 분석하여  $\alpha$ -cut fuzzy TOPSIS 방법에서 기대하는 불확실성 감소효과를 검토하였다. 스피어만 상관관계 분석결과, TOPSIS 기법을 적용한 평가결과와 비교한 경우에는 fuzzy TOPSIS 기법과의 상관관계가 더 높은 것으로 나타났으나 대체적으로  $\alpha$ -cut fuzzy TOPSIS 기법이 모든 평가방법에 대해서 높은 상관성을 보였다. 이 같은 결과는 퍼지수를 사용한 평가기법이 가중치 책정방법에 따른 불확실성 문제를 일정 부분 해소할 수 있는 것으로

볼 수 있으며  $\alpha$ -cut level set을 적용한 fuzzy TOPSIS와 같이 퍼지수의 과장 및 왜곡 문제를 고려하면 불확실성 문제의 해소에 있어 더욱 효과적임을 알 수 있다.

본 연구에서 제시한 평가절차는 다기준 의사결정기법을 적용한 홍수취약성 평가에 있어서 불확실성을 고려한 결과를 제시할 수 있으므로 치수관리 우선순위를 결정하기 위한 유용한 정보를 제공할 수 있다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원(70%)과 2010년 정부(교육과학기술부)의 재원을 한국연구재단의 기초연구사업(2010-0010609)의 지원(30%)을 받아 수행되었으며 이에 사의를 표한다.

## References

- Adger, V. (2006). "Vulnerability." *Glob Environ Change*, Vol. 16, No. 3, pp. 268-281.
- Adler, M., and Ziglio, E. (1996). *Gazing into the oracle: The Delphi method and its application to social policy and public health*, Jessica Kingsley Publishers, London.
- Angus, A.J., Hodge, I.D., McNally, S., and Sutton, M. A. (2003). "The setting of standards for agricultural nitrogen emissions: A case study of the Delphi technique." *J. Environ. Manage.*, Vol. 69, No. 4, pp. 323-337.
- Ashtiani, B., Haghhighirad, F., Makui, A., and Montazer, G.A. (2009). "Extension of fuzzy TOPSIS method based on interval-valued fuzzy sets." *Applied Soft Computing*, Vol. 9, pp. 457-461.
- Chu, T.C. (2002). "Selecting plant location via a fuzzy TOPSIS approach." *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 20, No. 11, pp. 859-864.
- Chung, E.S., and Lee, K.S. (2009). "Identification of spatial ranking of hydrological vulnerability using multicriteria decision making techniques: Case study of Korea." *Water Resour. Manage.*, Vol. 23, No. 12, pp. 2395-2416.
- Dubois, D., and Prade, H. (1978). "Operations on fuzzy numbers." *Int. J. Systems Sci.*, Vol. 9, No. 6, pp. 613-

- Feng, C.M., and Wang, R.T. (2000). "Performance evaluation for airlines including the consideration of financial ratios." *Journal of Air Transport Management*, Vol. 6, No. 3, pp. 133-142.
- Green, C. (2004). "The evaluation of vulnerability to flooding." *Disaster Prevention and Management*, Vol. 3, No. 4, pp. 323-329.
- Hwang, C.L., and Yoon, K.P. (1981). *Multiple attribute decision making: an introduction*. Sage Publications, Thousand Oaks London New Delhi, pp. 38-45.
- Hyde, K.M., Maier, H.R., and Colby, C.B. (2005). "A distance-based uncertainty analysis approach to multi-criteria decision analysis for water resource decision making." *Journal of Environmental Management*, Vol. 77, No. 4, pp. 278-290.
- Jun, K.S., Chung, E.S., Sung, J.Y., and Lee, K.S. (2011). "Development of spatial water resources vulnerability index considering climate change impacts." *Science of the Total Environment*, Vol. 409, No. 24, pp. 5228-5242.
- Kaufmann, A., and Gupta, M.M. (1991). *Introduction to fuzzy arithmetic: Theory and applications*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Kheireldin, K., and Fahmy, H. (2001). "Multi-Criteria Approach for Evaluating Long Term Water Strategies." *Water International*, Vol. 26, No. 4, pp. 527-535.
- Kienberger, S., Land, S., and Zeil, P. (2009). "Spatial vulnerability units-expert-based spatial modelling of socioeconomic vulnerability in the Salzach catchment, Austria." *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, Vol. 9, No. 3, pp. 767-778.
- Kim, D., Jung, Y., Park, M.J., Yoon, J.Y., Kim, S., and Choi, M. (2011). "Vulnerability Analysis of Water Resources Considering Climate Change." *J. of Wetlands Research*, Vol. 13, No. 1, pp. 25-33.
- Kim, G., Park, C.S., and Yoon, K.P. (1997). "Identifying investment opportunities for advanced manufacturing systems with comparative-integrated performance measurement." *Int. J. Prod. Econ.*, Vol. 50, No. 1, pp. 23-33.
- Kim, Y.K., Chung, E.S., and Lee, K.S. (2012). "Fuzzy TOPSIS Approach to Flood Vulnerability Assessment in Korea." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 9, pp. 901-913.
- Lai, Y.J., Liu, T.Y., and Hwang, C.L. (1994). "TOPSIS for MODM." *European Journal of Operational Research*, Vol. 76, No. 3, pp. 486-500.
- Lee, J.S. (2006). *Delphi method*. Kyoyokbook. pp. 7-16.
- Lee, K.S., and Chung, E.S. (2007). "Development of integrated watershed management schemes for an intensively urbanized region in Korea." *J. Hydro-Environ. Res.*, Vol. 1, No. 2, pp. 95-109.
- Lim, K.W., and Lee, D.R. (2009). "The spatial MCDA approach for evaluating flood damage reduction alternatives." *KSCE J. Civ. Eng.*, Vol. 13, No. 5, pp. 359-369.
- Linstone, H.A., and Turoff, M. (1975). *The Delphi method: Techniques and application*, Addison-Wesley Publishing Company Advanced Book Program.
- Messner, F., and Meyer, V. (2006). "Flood damages, vulnerability and risk perception challenges for flood damage research." *Flood Risk Management: Hazards, Vulnerability and Mitigation Measures*, edited by Schanze, J., Zeman, E., and Marsalek, J., Springer, pp. 149-167.
- Merz, B., Thielen, A.H., and Gocht, M. (2007). "Flood risk mapping at the local scale: concepts and challenges." *Flood Risk Management in Europe*, 25, *Advances in Natural and Technological Hazards Research*, edited by Begum, S., Stive, M.J.F., and Hall, J.W., Springer, Netherlands, pp. 231-251.
- Meyer, V., Scheuer, S., and Haase, D. (2009). "A multicriteria approach for flood risk mapping exemplified at the Mulderiver, Germany." *Nat. Hazards*, Vol. 48, No. 1, pp. 17-39.
- Moshkovich, H.M., Schellenberger, R., and Olson, D.L. (1998). "Data influences the result more than preferences: Some lessons from implementation of multiattribute techniques in a real decision task." *Decision Support Systems*, Vol. 22, No. 1, pp. 73-84.
- Munich Re (2012). *Natural catastrophes worldwide 1980-2012*, Munich Re, Munich.
- Oussalah, M. (2002). "On the compatibility between defuzzification and fuzzy arithmetic operations." *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 128, No. 2, pp. 247-260.

- Richey, J.S., Mar, B.W., and Horner, R.R. (1985). "The Delphi technique in environmental assessment I. Implementation and effectiveness." *J. Environ. Manage.*, Vol. 21, No. 2, pp. 135-146.
- Scheuer, S., Haase, D., and Meyer, V. (2011). "Exploring multicriteria flood vulnerability by integrating economic, social and ecological dimensions of flood risk and coping capacity: From a starting point view towards an end point view of vulnerability." *Natural Hazards*, Vol. 58, No. 2, pp. 731-751.
- Schoemaker, P.J., and Waid, C.C. (1982). "An Experimental Comparison of Different Approaches to Determining Weights in Additive Value Models." *Management Science*, Vol. 28, No. 2, pp. 182-196.
- Sebald, C. (2010). Towards an Integrated Flood Vulnerability Index: A Flood Vulnerability Assessment, Master of Science (MSc).
- Shih, H.S., Shyur, H.J., and Lee, E.S. (2007). "An extension of TOPSIS for group decision making." *Math. Comput. Model.*, Vol. 45, No. 7-8, pp. 801-813.
- Son, M., Sung, J.Y., Chung, E.S., and Jun, K.S. (2011). "Development of Flood Vulnerability Index Considering Climate Change." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 3, pp. 231-248.
- Triantaphyllou, E., and Lin, C.T. (1996). "Development and evaluation of five fuzzy multiattribute decision-making methods." *International Journal of Approximate Reasoning*, Vol. 14, No. 4, pp. 281-310.
- Wang, Y.M., and Elhag, T.M.S. (2006). "Fuzzy TOPSIS method based on alpha level sets with an application to bridge risk assessment." *Expert Systems with Applications*, Vol. 31, No. 2, pp. 309-319.
- Yoo, G.Y., and Kim, I.A. (2008). *Development and application of a climate change vulnerability index*. Korea Environment Institute, RE-05.
- Zimmermann, H.J. (1991). *Fuzzy set theory and its applications* (2nd ed.). Boston, MA: Kluwer-Nijhoff.

논문번호: 13-049	접수: 2013.05.17
수정일자: 2013.08.12/08.19	심사완료: 2013.08.19